

## 소양호 상류유역의 부유물질 유출특성에 의한 원단위 산정에 관한 연구

### A Study on the Estimation of the Unit Load by the Outflow Characteristics of Suspended Solids in the Upstream Watershed of So-yang Lake

최한규\*    최순규\*\*    박수진\*\*\*  
Choi, Han-Kuy    Choi, Soon-Kuy    Park, Soo-Jin

#### Abstract

In this research, we have selected the regions of Naerin river and Inbuk river where agricultural activities are actively carried out in the upper Soyang Reservoir and we have observed the changes of water quality while raining after finding out the characteristics of the outflow of floating materials by measuring the water quantity and water quality in division of rainy season and non-rainy season for those floating materials of generating pollutions of turbidity and malnutrition of the water for 4 years from 2002 to 2005.

Results of the observation showed that the outflow of floating materials is significantly affected by the surface outflow of rain water, in particular, the surface outflow was great in June -August period of flood seasons.

키워드 : 부유물질, 유출, 원단위, 부하량, 회귀분석

Keywords : *suspended solids, run off, unit load, loading, regression analysis*

#### 1. 서론

비점오염물질은 일반적으로 강우시 유출수와 함께 유출되기 때문에 강우기간동안의 배출량의 변화가 크고, 기상조건, 지질, 지형, 토지이용도, 식생상태 등의 영향을 받아 배출양상도 다양하므로 추정하기가 어려운 실정이다.

비점오염 유출량을 연중으로 살펴보면, 전체 유출량중에 약 45.9%가 7~8월에 유출되며, 건기인 10월에서 4월까지의 연간 총량의 약 20%, 5월에서 9월까지의 약 80%가 유출된다. 즉 강우기간에 오염 부하량이 증가되며, 수질이 악화가 된다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 비점오염물질의 유출에

영향을 미치는 강우량을 대상으로 상호 연관성을 알아보기 위하여 아래와 같은 연구를 수행하였다.

우선 본 연구를 위하여 소양강 수계 중 상류 지점인 내린천과 인북천 유역을 대상으로 하천 및 호소수의 탁도 및 부영양화를 일으키는 수질인자 부유물질(SS)을 2000년 ~ 2005년 까지 6개년동안 유량과 수질을 측정하여 강우시 수질인자가 변화하는 양상을 고찰하였으며, 각 유역으로부터 배출되는 강우사상별 오염부하량 유출특성을 파악하였다. 또한 단위면적당 유출량에 따른 오염 부하량의 회귀식을 개발하였고, 끝으로 연간 유출부하량을 산정하여 각 유역의 원단위를 강우시, 비강우시로 구분하여 유역의 유출 원단위를 제시하였다.

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 산업대학원 토목공학과 석사과정

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 2. 대상유역선정 및 연구방법

### 2.1 대상유역선정

비점오염물질 유출은 그 지역의 특성에 따라 차이가 크게 나타나기 때문에 정확한 비점오염원 원단위를 산정하기 위해서는 조사지점 유역의 선정이 가장 중요하다. 비점오염조사는 대유역의 하단에서 오염도와 유출량을 실측하는 방법과, 소단위의 토지이용으로 나누어 각 토지이용별 유출량과 오염도를 monitoring 하는 두 가지 방법이 있다. 전자는 유역 하류의 한 지점에서 하천수의 수량과 수질을 조사하여 강우와 하천오염부하량간의 상관 관계식을 도출하는데 주로 사용되며, 후자는 토지이용별 발생원단위를 결정하는데 이용된다. 따라서 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 연구하였다.

#### 2.1.1 연구지점

본 연구지점은 국내 최대 인공호인 소양호 상류유역으로 농업활동 및 고랭지 채소재배 단지로 비점오염원이 다량발생하는 것으로 판단되어지는 내린천, 인북천 유역을 연구지점으로 선정하여 강우시, 비강우시 구분하여 하천의 유량을 측정하고 수질을 조사하였다.

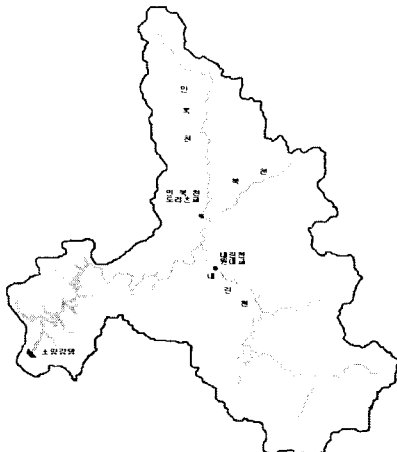


그림 1 소양강댐 유역의 주요하천 수계 및 연구지점도

## 2.2 연구방법

### 2.2.1 수질조사

본 연구에서는 소양호 상류유역의 내린천, 인북천 지점을 대상으로, 오염원의 유출측성을 신뢰성 있게 파악하기 위하여 유역의 하류지점을 선정하여, 강우량 20mm 이상 발생량을 기준으로 조사를 하였다. 내린천은 2002년 ~ 2005년 까지 총 4개년 동안 18차 강우사상에 걸쳐 조사를 하였으며,

인북천은 2002년 ~ 2004년 까지 3개년 동안 18차 강우사상 동안 유량과 수질을 측정하였다. 강우시는 초기강우에서 강우 종료시 수위가 강우 전 상태를 기준으로 하여 측정을 하였다. 수질항목 및 분석방법은 표 1에 나타내었다.

표 1 분석항목 및 분석방법

조사항목	분석방법
수온	수온온도계로 현장측정
DO	azide modification
BOD	20℃ 암실 5일간 배양 후 용존산소 농도차로 계산
COD	Korea Standard Method. Winkler Method Azid Modification
T-N	전처리 persulfate digestion법/ 측정 cadmium reduction법
T-P	전처리 persulfate digestion법으로 전처리 하고 ascorbic acid 법으로 측정
SS	U.S.A. atandard Method. celman Type A. Glass Fiber Filter

### 2.2.2 유량측정

유량 측정은 홍수, 평수, 저수시의 유량측정 방법과 감조천의 유량측정 원칙을 정하여 이에 따라 수행하는 것이 보통이다. 하천 규모 및 유량별로 측정방법을 달리 하는데, 본 연구에서는 홍수시에는 전자과 표면유속계를 이용하여, 유량측정을 실시하였다. 평·갈수기 기간에는 일반적으로 사용하는 프로펠러식 유속계(MCM - 2)를 사용하여 측정하였으며, 유량계산은 평균 단면법을 사용하였다. 유량계산법은 아래 식과 그림 2에 나타내었다.

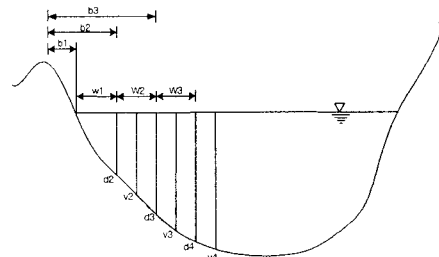


그림 2 유량계산 모식도

$$a_x = \frac{d_x + d_{x+1}}{2} (b_{x+1} - b_x)$$

$$q_x = V_x \frac{d_x + d_{x+1}}{2} (b_{x+1} - b_x)$$

여기서,  $q_x$ : 구분단면에서의 유량

$V_x$ :  $x$ 지점에서의 유속

$V_{x+1}$ :  $x+1$ 지점에서의 유속

$b_x$ : 초지점에서  $x$ 지점까지의 거리

$b_{x+1}$ : 초지점에서  $x+1$ 지점까지의 거리

$d_x$ :  $x$ 지점에서의 수심

$d_{x+1}$ :  $x+1$ 지점에서의 수심

### 2.2.3 강우량 산정

본 연구지점의 강우량을 산정하기 위하여 각 연구지점 유역에 영향을 주는 관측소를 선정하여 연구기간 동안의 강우량을 산정하였다.

내린천 유역은 현리, 창촌, 인제, 군량, 상남, 귀둔, 방동 관측소 지점의 Thissen망도를 작도하여 각 관측소의 강우량에 가중치를 적용하여 연구기간의 강우량 자료를 산정하였으며, 인북천유역의 경우 서화관측소, 원통관측소의 자료를 인용하여 연강우량을 산정하였다. 연구지점의 강우량 관측소는 표 2에 나타내었으며, 선정된 강우량은 표 3, 표 4에 나타내었다.

표 2 연구지점 유역의 강우량 관측소

유역명	소양강댐 전체유역	인북천 유역	내린천 유역	
유역면적 (km <sup>2</sup> )	2703	499.7	1075	
면적비 (%)	100	18	40	
T H I S S E N 가 중 비	서화	0.1804	0.89310	
	원통	0.05836	0.1069	
	현리	0.05043	-	0.12756
	창촌	0.09498	-	0.24042
	인제	0.07858	-	0.02558
	용태	0.10561	-	-
	군량	0.05436	-	0.08111

상남	0.12031	-	0.17889
귀둔	0.05873	-	0.14414
방동	0.07991	-	0.20230
추양	0.10561	-	-
신평	0.04081	-	-

표 3 내린천 유역 조사기간 및 강우량

조사 년도	강우 사상	조사기간 Date	강우량(mm)			
			조사 기간 강우 량	조사 기간 총 강우량	연평 균 강우 량	연간 총 강우량
2002 년도	1	7.23	65	562	1153	1313
	2	8.5 ~ 9	363			
	3	8.31 ~ 9.1	134			
2003 년도	1	7.22 ~ 23	137	529	1188	1759
	2	8.20	58			
	3	8.24 ~ 25	139			
	4	9.13	70			
	5	9.18 ~ 19	125			
2004 년도	1	7.5	10	316	1242	1545
	2	7.7 ~ 8	50			
	3	7.12 ~ 13	97			
	4	8.18 ~ 19	117			
	5	9.13	42			
2005 년도	1	5.17 ~ 19.	32	394	1,170	1114
	2	6.26 ~ 28	206			
	3	7.27 ~ 29	65			
	4	8.18 ~ 20	39			
	5	9.14 ~ 15	52			

표 4 인북천 유역 조사기간 및 강우량

조사 년도	강우 사상	조사기간 Date	강우량(mm)			
			조사 기간 강우 량	조사 기간 총 강우량	연평 균 강우 량	연간 총 강우량
2002 년도	1	7.6	32	311	969	916
	2	8.5 ~ 8	179			
	3	8.31 ~ 9.1	100			

2003 년도	1	6.27 ~ 28	31	864	1051	1475
	2	7.8 ~ 10	50			
	3	7.18 ~ 19	48			
	4	7.21 ~ 25	128			
	5	8.5 ~ 7	101			
	6	8.19 ~ 21	96			
	7	8.23 ~ 25	225			
	8	9.5	26			
	9	9.12 ~ 13	72			
	10	9.18 ~ 19	87			
2004 년도	1	5.28 ~ 29	36	557	1095	1231
	2	6.19 ~ 21	94			
	3	7.4 ~ 6	50			
	4	7.12 ~ 14	176			
	5	8.16 ~ 19	201			

$$= \text{조사기간유출부하량 (kg/event)} \times \frac{\text{연평균강우량 (mm)}}{\text{조사기간의총강우량 (mm)}} \quad (2)$$

### 2.2.6 원단위 산정

본 연구에서는 장기간 동안 연속해서 비점오염원을 실측조사를 할 수 없었기 때문에 실측조사를 한 기간에 대해서 산정된 원단위를 연간강우량에 연결시켜 산정하였다.

원단위 산정기준은 발생량 기준, 유출량 기준, 유달량 기준의 세 가지로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 강우시 비점오염원이 유출되는 양을 실측해서 원단위를 산정하였으며, 산정 방법은 표 5에 나타내었다.

표 5 비점오염원 원단위 환산법

환산 방법	계산식
식집강우횟수 적용법	$L = NI_a$
유효우량비법	$L = I_a (P_a/p_a)$
유출량비법	$L = I_m (Q_m/q_m)$
유출량 - 가중농도법	$L = N[I_a(Q_a/q_a)]$

### 2.2.4 유량 가중평균 농도

본 연구에서는 강우시 비점오염원 유출수의 유출 특성을 잘 나타내는 유량가중 평균 농도를 선정하여 제시하였다. 유량가중 평균 농도를 산정하는 방법으로는 오염물질에 유량을 곱하여 부하량을 산정한 다음, 다시 이를 더하여 누적 부하량을 산출한 뒤 최종적으로 누적부하량을 각 강우사상에 대한 누적 유량을 나누어 산정하였다. 유량 가중평균 농도를 산정하는 방법은 식 1에 나타내었다.

FWMC (Flow weighted mean concentration)

$$= \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

$\sum Q_i C_i$  :  $i$  번째 강우 사상의 누적 오염 부하량

$\sum Q_i$  :  $i$  번째 강우 사상의 누적 유출량 (1)

### 2.2.5 연간 유출 오염부하량 산정

본 연구에서는 연간 유출 오염 부하량을 산정하기 위하여 연평균 강우량과 조사시기의 강우량의 비율 이용하여 산정하였다. 산정방법으로는 각 연구기간 동안의 부하량을 누적시킨 다음 조사기간의 강우량을 모두 합하여 연구기간 동안의 총강우량을 구한뒤 여기에 연평균 강우량을 나눈 비율 이용하여 산정하였다. 산정 방법은 식 2)에 나타내었다.

연간 오염 유출부하량 (kg/year)

- (법)  $L$  : 연간 부하량  
 $N$  : 연간 유출이 일어난 횟수  
 $I_a$  : 출수당 평균부하량  
 $P_a$  : 연평균 강우량  
 $p_a$  : 조사기간 동안 강우량  
 $Q_m$  : 연간 유출량  
 $q_m$  : 조사기간 유출량  
 $I_m$  : 실측기간에서의 유량가중평균 농도  
 $Q_a$  : 모집단에서 일출수당 평균유출량  
 $q_a$  : 표본에서의 일출수당 평균유출량

## 3. 분석 및 고찰

### 3.1 연구지점의 유량-수질 변동

#### 3.1.1 내린천 유역의 유량-수질 변동

내린천 유역의 강우시 연구기간동안의 측정된 부유물질 농도를 살펴보면, 2002년 40.5mg/ℓ ~ 1300mg/ℓ, 2003년 20.1mg/ℓ ~ 968mg/ℓ, 2004년 10.2mg/ℓ ~ 260.5mg/ℓ, 2005년 0.2mg/ℓ ~ 262mg/ℓ로 나타났다.

아래 그림 3 ~ 그림 6은 내린천 유역의 측정기간 동안 수질농도와 유량을 그래프로 나타내었다.

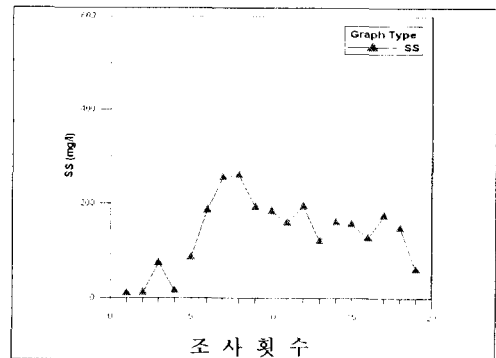
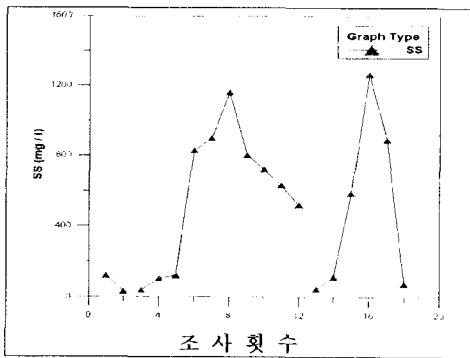
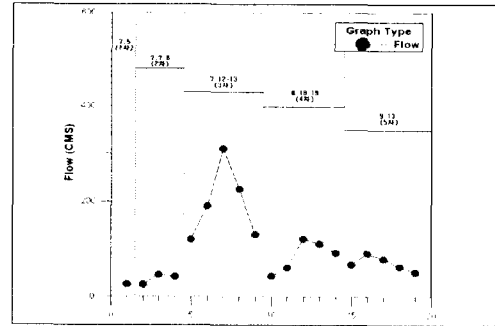
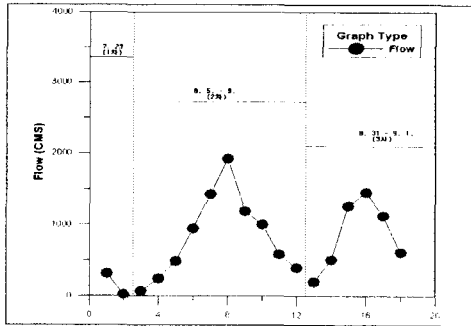


그림 3 2002년 내린천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

그림 5 2004년 내린천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

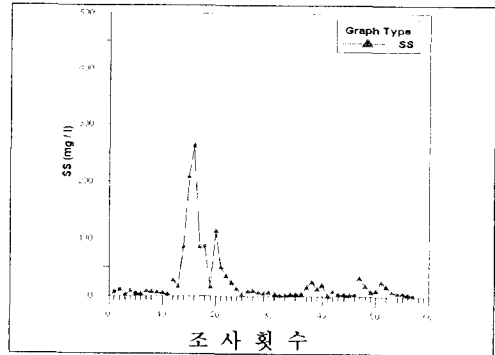
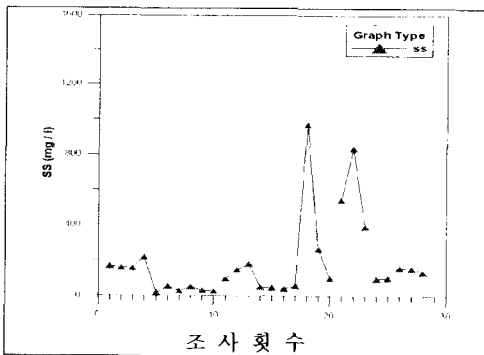
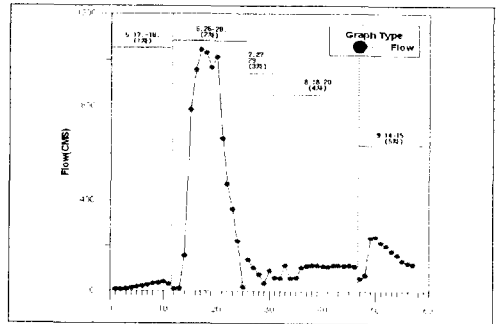
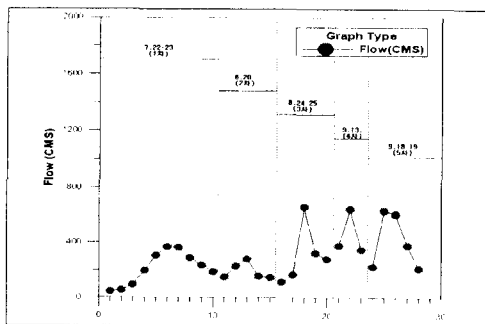


그림 4 2003년 내린천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

그림 6 2005년 내린천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질농도

### 3.1.2 인북천 유역의 유량-수질 변동

인북천 유역의 강우시 기간동안의 부유물질 농도를 살펴보면, 2002년 28.7mg/l ~ 1256.7mg/l, 2003년 5.1mg/l ~ 548mg/l, 2004년 4.6mg/l ~ 838.0mg/l로 나타났다. 아래 그림 7 ~ 그림 9는 연구기간 동안의 측정된 유량과 수질을 그래프로 나타내었다.

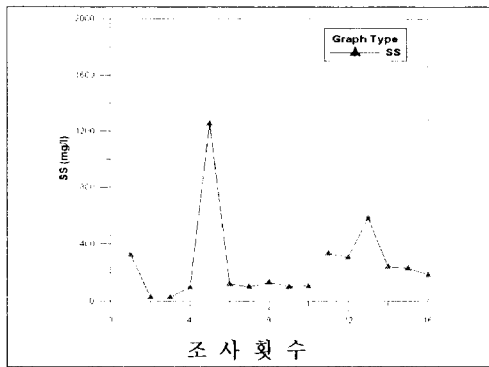
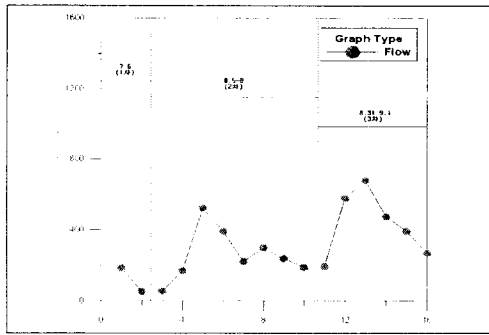


그림 7 2002년 인북천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

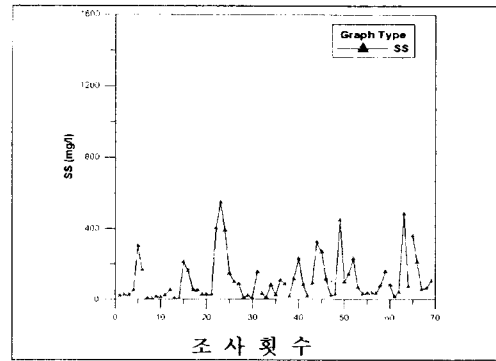
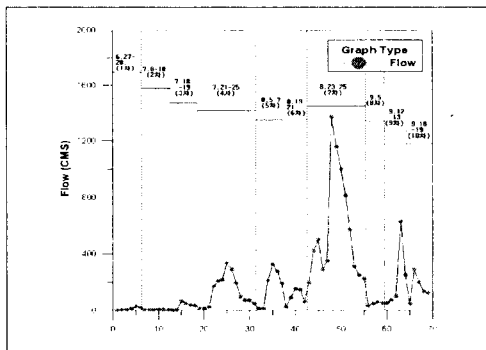


그림 8 2003년 인북천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

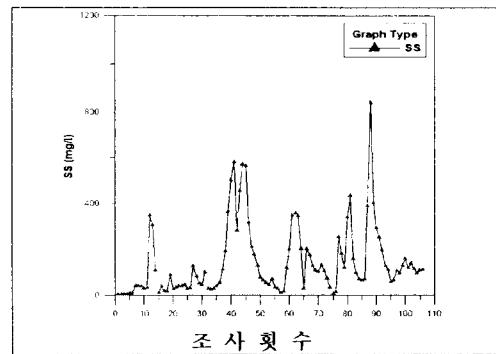
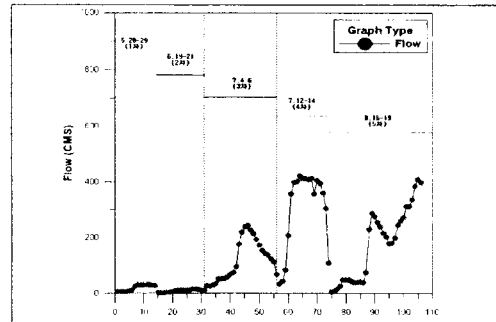


그림 9 2004년 인북천 유역의 측정기간 동안 유량 및 수질

### 3.2 유량가중 평균농도 산정

본 연구지점의 연구기간 동안 각 강우사상별 유량가중평균 농도를 산정 하였으며, 내린천 유역의 경우 2002년은 119.7mg/l ~ 841.5mg/l, 2003년 82.1mg/l ~ 641.7mg/l, 2004년 10.2mg/l ~ 213.8mg/l, 2005년 5.6mg/l ~ 103.6mg/l의 범위를 나타내었다.

인북천 유역의 경우 2002년은 325.0mg/l ~ 395.6mg/l, 2003년 20.3mg/l ~ 300.9mg/l, 2004년 56.0mg/l ~ 259.5mg/l로 산정되었다.

아래 표 6은 각 연구지점별 유량가중평균 농도를

나타내었다.

표 6 강우사상별 유량가중평균농도

유역	조사년도	구분	SS(mg/l)	조사기간 강우량
내린천	2002년도	강우시	119.7~841.5	562
		비강우시	-	
	2003년도	강우시	82.1~641.7	529
		비강우시	1.2~15.6	
	2004년도	강우시	10.2~213.8	316
		비강우시	1.2~5.3	
	2005년도	강우시	5.6~103.6	394
		비강우시	3.8~13.2	
인북천	2000년도	강우시	-	-
		비강우시	1.3~13.7	
	2001년도	강우시	-	-
		비강우시	-	
	2002년도	강우시	325.0~395.6	311
		비강우시	1.0~10.0	
	2003년도	강우시	20.3~300.9	864
		비강우시	2.5~7.1	
	2004년도	강우시	56.0~259.5	557
		비강우시	4.78~12.8	
2005년도	강우시	-	-	
	비강우시	1.1~6.0		

### 3.3 오염 부하량 산정

#### 3.3.1 연간 유출 오염부하량 산정

각 연구지점의 연평균 강우량비를 이용하여 강우시 연간 유출 부하량을 산정하였으며, 각 연구지점별 연간 유출 부하량은 표 7에 나타내었다.

표 7 연구지점별 연간 오염 유출 부하량

유역명	조사년도	부하량 (kg/year)	강우량 (mm)
내린천	2002년	651,617,924	1,313
	2003년	444,719,337	1,759
	2004년	232,214,871	1,545
	2005년	32,199,447	1,114
	평균 부하량	340,187,895	-
인북천	2002년	196,936,824	916
	2003년	103,985,360	1,475
	2004년	76,160,731	1,231
	평균 부하량	125,694,305	-

#### 3.3.2 비강우시 유출 오염부하량 산정

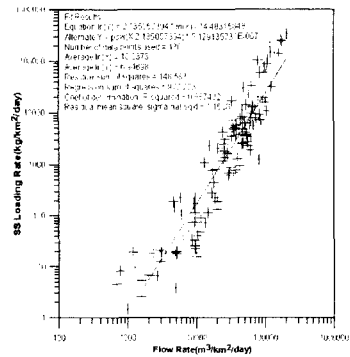
각 연구지점의 비강우시 오염유출 부하량을 산정하였으며, 각 연구지점별 비강우시 오염 부하량은 표 8에 나타내었다.

표 8 연구지점별 비강우시 유출 부하량

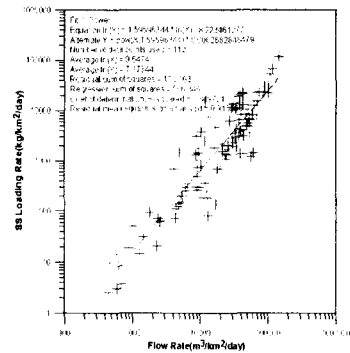
유역명	조사년도	부하량 (kg/day)	유출량 (m <sup>3</sup> /sec)
내린천	2003년	15,242	30.7
	2004년	17,148	46.8
	2005년	16,222	40.2
	평균부하량	16,204	-
인북천	2000년	4,931	10.0
	2001년	-	-
	2002년	6,200	9.8
	2003년	5,390	11.5
	2004년	5,489	8.63
	2005년	4,025	12.7
평균부하량	5,207	-	

### 3.4 면적대비 유출량과 오염부하량 간의 회귀분석

연구지점별 면적대비 유출량과 면적대비 오염 부하량 간의 회귀분석을 실시하였으며, 지점별 면적 대비 유출량과 오염 부하량의 상관도는 그림 10에 나타냈으며, 회귀식은 표 9에 나타내었다.



(a) 내린천 유역(SS Loading)



(b) 인북천 유역(SS Loading)

그림 10 연구지점별 유출량과 오염 부하량의 상관도

표 9 면적대비 유출량 - 오염 부하량의 회귀식

유역명	항목	회귀식	결정계수(R <sup>2</sup> )
내린천	SS loading	$L = (5.1291e-7) \times Q^{2.135}$	0.87
	인북천	$L = (2.6828e-4) \times Q^{1.595}$	

3.4 원단위 산정

3.4.1 강우시 원단위 산정

연평균 강우량비를 이용하여 연구지점별 원단위를 산정하였으며, 산정된 원단위는 아래 표 10에 나타내었다.

표 10 연구지점별 강우시 원단위 산정

유역명	연도별	SS(kg/km/year)
내린천	2002년	618,233
	2003년	421,934
	2004년	220,318
	2005년	30,549
	평균원단위	322,759
인북천	2002년	394,110.1
	2003년	208,095.6
	2004년	152,412.9
	평균원단위	251,540

(2) 비강우시 원단위 산정

일 유출량을 이용하여 각 연구지점별 비강우시 원단위를 산정하였으며, 산정된 원단위는 아래 표 11과 같다.

표 11 연구지점별 강우시 원단위 산정

유역명	연도별	SS(kg/km/day)
내린천	2003년	14.4
	2004년	16.2
	2005년	15.4
	평균원단위	15.4
인북천	2000년	9.9
	2001년	
	2002년	12.4
	2003년	10.8
	2004년	10.9
	2005년	8.1
평균원단위	10.4	

4. 결론

본 연구는 하천 오염원의 효율적인 관리방안을 위하여 강우시·비강우시 기간의 유량과 수질농도를 실측하여 부유물질 유출특성을 파악하고 이를 분석하여, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 강우시 비강우시기간의 수질농도를 비교분석한 결과 비강우시 기간에는 하천 수질등급 1급수의 수질등급을 보이다가 강우시 기간에는 부유물질의 유출이 크게 일어나 하천 수질등급 5급수 이상의 수질등급으로 수질이 급격히 악화되는 것을 알 수 있다.

2) 부유물질 유출은 강우량에 지배적인 영향을 받으며, 특히 강우의 지표유출로 인하여 크게 발생하고, 특히 홍수 기간인 6월~8월 사이에 크게 유출되는 것을 알 수 있었다.

3) 면적대비 유출량에 따른 오염부하량 간의 회귀분석을 실시한 결과 내린천 유역은  $SSLoading = (5.1291e-7) \times Q^{2.135}$ , 결정계수 0.87, 인북천 유역은  $SS Loading = (2.6828e-4) \times Q^{1.595}$ , 결정계수 0.85 와 같이 각 연구지점별 회귀식을 개발할 수 있었다.

4) 하천 오염원의 효율적인 관리방안 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있도록 각 연구지점별 부유물질의 유출특성을 파악하여 다음과 같이 원단위를 산정하였다. 강우시 기간 내린천 유역 323ton/km/year, 인북천 유역의 경우 252ton/km/year 값을 산정할 수 있었다.

비강우시 기간 내린천 유역 15.4kg/km/day, 인북천 유역 10.4kg/km/day의 값을 산정할 수 있었으며, 내린천 유역과 인북천 유역을 서로 비교한 결과 강우시 기간 내린천 유역이 다소 높게 산정되었다. 이는 내린천 유역이 인북천 유역에 비하여 유역내 고랭지 채소 재배단지, 밭, 도로, 대지 등이 넓게 분포하기 때문에 다소 높게 산정된 것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] 박수진, "소양호 상류유역의 비점오염원 유출 특성에 의한 원단위 산정", 강원대학교 대학원, 2005.  
 [2] 박무중, 손광익, "토양침식의 발생 원인과 분포 특성", 한국수자원학회지, 제 31권 제 6호, pp 26~33, 1998.  
 [3] 한국환경정책 평가연구원, 농업지역 비점오염



산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제26권 B호, 2006.

소양호 상류유역의 부유물질 유출특성에 의한 원단위 산정에 관한 연구

원 관리방안 연구, 1998.

- [4] 안미희, “비점오염원의 원단위 오염부하량에 대한 실험적연구”, 서울대학교 보건대학원, 1995.
- [5] 윤용남 외, “2차원 수리모형을 이용한 교랑에 서의 홍수로 인한 최대세굴 심도 예측”, 한국수자원학회 학술 발표회 논문집, 1995
- [6] D.M. Kent , “Applied Wetlands Science and Technology”, Lewis Publishers. CRC Press, Boca Ration, FL. pp. 243~262, 1994.
- [7] Bloesch, J.P., Stadelman and H. Buhner., “Pri-ary production and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss lakes.”, *Limnol. Oceanogr.* 22, pp 511~526, 1997.